УДК 553.311

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

В.Г. Ворошилов

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Рассмотрены существующие концепции возникновения зональности в гидротермальных рудно-метасоматических системах. Основное внимание уделено дискуссионным физико-гидродинамическим аспектам их формирования Изложена авторская точка зрения на механизм образования зонально построенных аномальных структур геохимических полей. Предложена гипотеза возникновения и функционирования сероводородного барьера при образовании гидротермальных месторождений.

Аномальные геохимические поля не существуют сами по себе, а являются отражением состава зонально построенных геологических тел. За более чем столетнюю историю интенсивного изучения зональности были рассмотрены десятки разнообразных причин и механизмов ее формирования. В то же время, универсальный характер зональности гидротермальных месторождений свидетельствует о том, что в основной своей массе эти причины на самом деле являются следствиями какого-то более общего явления. Удивительная выдержанность общей схемы вертикальной рудной зональности связывается со времен Сперра и Эммонса со снижением давления и температуры по мере приближения к дневной поверхности. Этот глобальный физико-механический барьер вызывает появление различных химических барьеров и, как следствие, осаждение элементов в виде устойчивых соединений. Последовательность осаждения определяется, прежде всего, концентрациями элементов, а в более общем плане – соотношениями их кларков. Генеральный порядок минералоотложения нередко нарушается вплоть до формирования на отдельных участках «обратной» зональности. Причиной этому служит наличие локальных геохимических барьеров, в качестве которых могут выступать границы контрастных по составу пород, области смешивания гидротерм с потоками растворов и газов иного состава, ослабленные тектонические зоны и т.п. Немаловажное значение имеют также различия в скорости фильтрации разнообразных комплексных соединений, в форме которых, по мнению большинства исследователей, переносятся рудные компоненты. Наибольшая же контрастность зональности связана с повторными тектоническими подвижками в течение процесса рудоотложения, что приводит к пространственному обособлению отдельных минеральных и геохимических ассоциаций. Именно эта контрастность послужила причиной ожесточенных дискуссий между сторонниками пульсационной и эволюционной гипотез рудообразования. Сам факт этих споров свидетельствует о том, что структурный аспект является одним из важнейших в проблеме зональности.

Термодинамические основы процесса формирования зональности разработаны в трудах Д.С. Коржинского и его многочисленных последователей, в настоящее время – это наиболее хорошо обоснованная в теоретическом отношении концепция. Вопросы, касающиеся механизмов зарождения и миграции рудоносных флюидов, особенно в тонкопористых средах, пока до конца не решены и остаются предметом оживленных дискуссий.

В основе большинства гипотез, рассматривающих физико-гидродинамические аспекты формирования зональности, лежит концепция зарождения и развития фильтрующихся гидротермальных систем, предложенная Г.Л. Поспеловым [1]. В строении таких систем Г.Л. Поспеловым выделено 3 главных зоны: 1) корневая, где происходит стягивание флюидов к дренирующим структурам, 2) рассеяния (разгрузки) и 3) соединяющая их стволовая зона со сложным режимом проходного, в основном напорного, потока. Оруденение может быть приурочено к любой из этих зон, в зависимости от генетического типа месторождения, но главной областью рудоотложения Г.Л. Поспелов считал стволовую зону.

Корневые зоны рассматриваются Г.Л. Поспеловым как некоторые области, где горные породы обогащены в силу разных причин межзерновыми, поровыми и капиллярными скоплениями флюидов. Такая загазованная и увлажненная область является капиллярно-пористой системой, поэтому перенос вещества здесь неотделим от переноса тепла и в математическом отношении подобен ему. При появлении трещины внутри нагретых флюидизированных масс происходит не только приток в трещину газов и жидкостей, но и отток их по микрокапиллярам в результате теплового скольжения. В итоге происходит высушивание околотрещинных участков с исчезновением крупных пор и увеличением количества микропор. После выравнивания температуры и давления эти участки вновь увлажняются за счет влияния градиента влажности. Новое раскрытие трещины приводит к повторению стягивающего эффекта, но количество воды будет меньше, чем в первый раз, а концентрация рудных компонентов выше. Стягивающим эффектом могут обладать также магматические тела, особенно дайки и мелкие штоки (тепловые флюидопроводники), имеющие бульшую массоемкость, чем вмещающие породы. Особенно благоприятно сочетание тектонических и магматических дренирующих структур, поскольку они работают в одном направлении, выводя растворы в стволовую зону.

Стволовая зона фильтрующейся термогидроколонны находится в условиях возрастающего горизонтального градиента температур и напорного движения восходящей массы флюидов. Это приводит к двум противоположным процессам в движении околотрещинных поровых растворов. С одной стороны, термический градиент и тепловое скольжение обусловливают стягивание к стволу, как источнику нагрева, растворов из ореольной зоны промачивания. С другой стороны, напор и высокая влажность в пределах ствола стремятся рассеять колонну флюидов. Какая из этих тенденций возобладает в конкретном случае, зависит от многих факторов. В общем случае, наличие сплошных открытых каналов на протяжении всего ствола приводит к образованию протяженных жил выдержанного состава. При наличии подпруживающего эффекта (водяная пробка, отложение минералов, встречный поток напорных вадозовых вод и т.д.) стволовой поток рассеивается на отдельные струи, каждая из которых далее движется самостоятельно. При этом формируются зоны метасоматической проработки, которые по мере остывания потока сменяются все более локальными метасоматитами и жильными телами. Гипотеза допускает последовательное развитие этих разнотемпературных процессов на одном гипсометрическом уровне и этим выгодно отличается от моделей, абсолютизирующих вертикальную метасоматическую зональность.

Исходя из концепции Г.Л. Поспелова, следует ожидать, что, если нет устойчивого дренажа, то стволовая зона не образуется и конденсация растворов произойдет в верхней части корневой зоны. Более того, при определенных условиях можно ожидать, что концентрации флюидов не произойдет даже в пределах корневой зоны и весь потенциал гидротермальной системы реализуется лишь в виде рассеянной вкрапленности рудных минералов. Такие обстановки должны быть особенно характерны для апикальных частей магматических тел, где покрышка роговиков и кристаллическая оболочка остывающей интрузии играют роль естественных экранов. Можно констатировать, что такие процессы и в самом деле обычны для выступов и апофиз остывающих магматических тел, к которым нередко приурочены контактовые месторождения и зоны рассеянной минерализации.

Что касается стволовой зоны термогидроколонны, то имеющиеся факты входят в некоторое противоречие с концепцией Г.Л. Поспелова. В частности, если интенсивность метасоматических изменений зависит от напора флюидов, то должна быть прямая связь между мощностью жилы и интенсивностью (мощностью) околожильных изменений. Такой связи, как правило, не наблюдается. В то же время, есть четкая прямая зависимость между интенсивностью околожильного метасоматоза и количеством рудных минеральных ассоциаций в жиле. Последние в большинстве своем возникали при повторных тектонических подвижках в локальных участках уже сформировавшихся жил и не имели прямой связи с корневой зоной.

С точки зрения Е.В. Плющева [2] рудоносные системы проходят в своем развитиии несколько ступеней концентрирования рудных компонентов. На раннем этапе, в процессе стягивания флюидов к дренажным структурам, формируются площадные метасоматиты (пропилитизация, фельдшпатолиты, калишпатофиры и т.д.), а растворы обогащаются рудными компонентами. Затем, проходя через рудолокализующие структуры, флюиды последовательно формируют рудную, ореольную и фоновую зоны, выходя в надбарьерную зону в качестве «отработанного» раствора. Автором подчеркивается, что во всех этих процессах участвует один и тот же объем растворов и чем он больше, тем продуктивнее гидротермальная система.

Гипотеза Г.Л. Поспелова дополнена впоследствии представлениями о конвективном механизме функционирования гидротермальных систем, где в качестве тепловой машины выступает интрузия, или другой энергетический источник [3]. Это в значительной мере решает проблему огромного объема флюидов, необходимых для переноса металлов при формировании месторождений. При длительном существовании таких систем вокруг месторождений должна образоваться обширная зона выноса компонентов, сформировавших рудные тела в центральных зонах восходящих потоков. К сожалению, гидротермальные месторождения почему-то образуются далеко не над всеми интрузивными телами, к тому же охотнее – над гранитоидами, а не над более горячими интрузиями основного состава. По-видимому, конвекция не является определяющим фактором при формировании месторождений и сопутствующей им зональности, хотя само существование конвективных систем в насыщенной нагретыми флюидами среде очевидно.

С несколько иных позиций рассматривает механизм формирования рудной зональности П.Ф. Иванкин [4]. Этим автором выделяется два типа рудных полей, в зависимости от начального состояния рудоносного флюида. Гидротермы 1-го типа зарождались в виде надкритического газа и отделялись от магматического тела по всей его поверхности. Проходя через вмещающие породы, эти флюиды производили площадные метасоматические изменения и, по мере остывания, конденсировались и стягивались к дренирующим трещинам. Поэтому рудно-метасоматические колонны, связанные с такими флюидными системами, имеют сужающуюся вверх форму и носят название ореольных или бескорневых. В соответствии с современными представлениями о генезисе рудно-метасоматических систем, к ореольным относятся контактовые (скарновые, грейзеновые, альбититовые) рудные поля.

Гидротермы 2-го типа, возникшие изначально в жидкой фазе на поздних стадиях магматической кристаллизации, представляют из себя сжатый глубинный флюид, менее подвижный, чем газ, но более подвижный, чем магма. Формируются эти флюиды в замкнутых остаточных очагах, расположенных, как правило, ниже тех фронтальных зон интрузивов, из которых происходит «испарение» летучих, дающих гидротермы 1-го типа. При движении

глубинного флюида к поверхности происходит увеличение его объема за счет внутренней гидродинамической неустойчивости, возрастающей при снижении давления. Иногда этот процесс носит взрывообразный характер, в результате чего образуются рудные эксплозивные брекчии. В других случаях явных признаков взрыва нет и на первый план выступают эволюционные изменения в потоке расширяющегося флюида. Причинами этих изменений, по П.Ф. Иванкину [4], являются: а) расширение газов и газированных жидкостей; б) окислительно-восстановительные реакции; в) газово-жидкостная кинетическая дифференциация флюида; г) структурные превращения жидкости. Этим автором убедительно показано, что при простом перемещении массы воды, нагретой до 400 °С с глубин 7...8 км до 1...2 км объем ее увеличивается в 3...4 раза. При дальнейшем падении давления система переходит в докритическую область, расслаивается на жидкость и газ и увеличивает свой объем в десятки и сотни раз. Аналогичными свойствами обладают углекислота, летучие соединения серы, галоиды и др. С другой стороны, верхняя часть колонны гидротерм является одновременно зоной наиболее вероятного образования взрывчатых смесей из отделяющихся от флюида газов (CH_4, H_2, Cl_2, O_2, F_2 и других). Причиной появления избыточной энергии раствора на стадии расширения колонны могут явиться также внутренние структурные превращения в жидкости (образование сиботаксисов, полимеризация и т.д.). Все описанные процессы протекают на фоне газово-жидкостной дифференциации компонентов флюида, приводящей к накоплению более подвижных кислотных компонентов в расширяющейся верхней части колонны. В целом, корневые рудные поля имеют форму расширяющихся вверх конусообразных структур, минеральный и химический состав которых усложняется снизу вверх.

Исходя из этой концепции, зональность рудных полей и месторождений ореольного типа должна быть центростремительной относительно дренирующих тектонических структур. На примере золото-скарновых и скарново-магнетитовых месторождений мы неоднократно имели возможность убедиться, что это действительно так. При этом, для реализации рудоносного потенциала флюидов необходима благоприятная тектоническая обстановка в период их конденсации (образование дренажных трещин, тектонических ловушек, плоскостей отслоения и т.д.). Тектоническая активность, кроме того, создает условия для дополнительного проявления здесь же глубококорневых рудных тел, что характерно, к примеру, для Ольховско-Чибижекского рудного поля. В грейзенах также обычно картируется концентрическая сходящаяся зональность вокруг локальных ослабленных зон под малопроницаемой покрышкой роговиков [5]. Кристаллизация вторичных минералов сопровождается выведением из системы значительных количеств воды, что приводит к дальнейшему падению давления и усилению процесса миграции флюидов из внешних зон грейзенизации во внутренние. Характерно, что интенсивное накопление W в центральных частях грейзеновых тел сопровождается выносом его из полевых шпатов во внешних зонах грейзенизации.

Зональность корневых рудных полей должна быть центробежной. Однако, это утверждение справедливо далеко не всегда. Наиболее характерным случаем для золоторудных месторождений этого типа является сочетание центробежной зональности месторождений с центростремительной зональностью рудных столбов [6].

И.С. Гольдберг с соавторами [7] связывают наличие ореолов выноса вокруг месторождений (полярная зональность) с геоэлектрохимическими процессами. В соответствии с этой концепцией, под действием природных электрических полей металлы растворяются и мигрируют в направлении полюсов электрохимической системы, отлагаясь по пути на различных геохимических барьерах. Положительным моментом этой гипотезы является то, что она снимает проблему огромной массы растворов, которые должны проходить через область рудоотложения, постоянно обновляясь. Показательно, что, согласно данным этих авторов, полярная зональность в большинстве случаев проявляется в виде концентрических («орехоподобных») аномальных структур в месторождениях самых различных типов, включая магматические. Отсюда можно сделать вывод, что, если подобные полюса и существовали в период рудоотложения, то их возникновение и функционирование явно провоцировалось появлением локальных областей разряжения.

По нашему мнению, на начальном этапе развития гидротермальной системы корневого типа формируется центробежная минеральная и геохимическая зональность, отражающая общее снижение температуры и давления на пути движения флюида к земной поверхности. В этот период вдоль ослабленных зон формируются предрудные метасоматиты площадного типа, которые впоследствии сменяются все более локальными околотрещинными гидротермалитами. Жильное выполнение, представленное вначале безрудным кварцем, с течением времени осложняется появлением различных сульфидных и кврцево-карбонатно-сульфидных парагенезисов. Формирование новых ассоциаций, как правило, сопровождается дроблением ранее образованных минералов, то есть импульсы рудоотложения провоцируются тектоническими подвижками. Представляется очевидным, что после уравновешивания внутреннего давления флюида внешней литостатической нагрузкой, зональность рудоотложения будет определяться, в основном, локальными тектоническими подвижками, нарушающими установившееся равновесие. Наиболее хрупким это равновесие является в верхней части рудно-метасоматической системы, с чем, очевидно, и связано проявление здесь многочисленных «стадий» минерализации, не фиксирующихся в прикорневой зоне. Ввиду постепенного затухания гидротермально-

го процесса и уменьшения объемов минералообразования от ранних ассоциаций к поздним, зональность таких участков является сходящейся. Учитывая то, что продуктивность руд часто пропорциональна количеству минеральных рудных ассоциаций и возрастает от ранних парагенезисов к поздним, можно ожидать, что зональность рудных столбов на месторождениях корневого типа будет иметь центростремительный характер.

Обычно принято считать, что подток растворов к участку рудоотложения осуществляется по открытым полостям. Разногласия касаются, по-существу, лишь расстояний перемещения флюидов. Сторонники «стадийности» утверждают, что каждая новая порция растворов приходит из некоего глубинного очага, приверженцы противоположной концепции полагают, что минералообразование осуществляется из единого потока растворов, эволюция которого происходит в процессе рудоотложения.

В золоторудных полях кварцево-жильные тела пространственно всегда тяготеют к участкам развития площадных предрудных метасоматитов, то есть, к протяженным и мощным ослабленным зонам. В то же время, непосредственно в этих зонах жилы представлены пережимами и проводниками, а кварцево-сульфидные линзы и рудные столбы с интенсивной березитизацией приурочены к участкам вмещающих пород, слабо измененных площадными процессами (рис. 1).

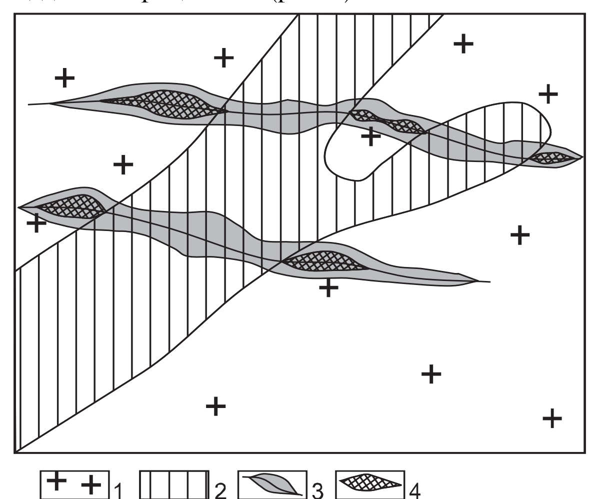

Рис. 1. *Схема пространственных взаимоотношений площадных предрудных метасоматитов и золотоносных кварцево-сульфидных жил: 1) слабо измененные гранитоиды; 2) зоны повышенной проницаемости с площадными предрудными метасоматитами; 3) рудовмещающие трещины с березитами; 4) кварцево-сульфидные линзы*

Эта типичная для кварцево-жильных месторождений ситуация на первый взгляд тривиальна, но из нее вытекают очень любопытные выводы. Приходится признать, что кварцево-сульфидные жилы образовались не под действием гидроразрыва, как следствия нагнетания растворов из глубины (в этом случае они бы локализовались прежде всего в ослабленных зонах), а в результате всасывания флюидов из ослабленных зон в полости, возникавшие в результате тектонических подвижек. Следовательно, для формирования аномальных структур геохимических полей (АСГП) наиболее важными являются эволюционные преобразования растворов и их перемещения, происходящие за пределами открытых трещин, в поровом пространстве вмещающих пород. В результате резкого раскрытия трещины растворы устремляются в нее из всего окружающего пространства. Резкое обеднение внутренних зон березитов теми элементами, которые концентрируются в сопряженном участке жилы в виде локальных минеральных скоплений, а также формирование зон выноса по периферии рудных столбов мы связываем именно с этим процессом (рис. 2). Этим же объясняется обычно налюдаемое снижение температуры образования минералов от периферии жил к их центру.

Поскольку в этих условиях должен ярко проявляться фильтрационный эффект [8], следует ожидать локального возобновления процессов кислотного выщелачивания и непропорционального разрастания внутренних зон березитов на таких участках. В самом деле, относительная мощность внутренней зоны березитов в изученных нами месторождениях прямо корреспондирует количеству минеральных ассоциаций в жиле и в участках максимального оруденения достигает 70...80 % на фоне 40...60 % за пределами рудных столбов [9]. Не случайно, существует мнение, что околорудные метасоматиты образуются в результате вскипания растворов, движущихся из вмещающих пород к раскрывающейся трещине, а не наоборот [10].

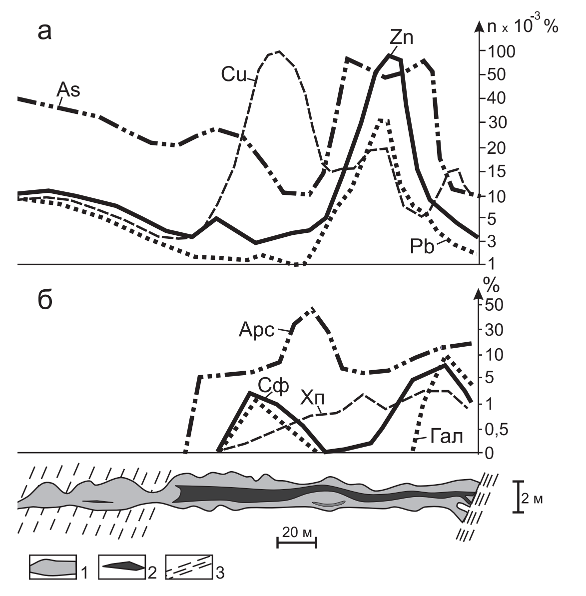

Рис. 2. *Вынос халькофильных элементов из внутренней зоны березитов на участках сопряженного отложения сульфидов в жиле (Центральное месторождение, жила Тысячная, горизонт +336 м): 1) околожильные березиты; 2) кварцево-сульфидные линзы; 3) зоны повышенной проницаемости; а) распределение элементов в березитах; б) концентрация сульфидов в жиле: арсенопирита (Арс), халькопирита (Хп), сфалерита (Сф), галенита (Гал)*

Ввиду того, что рудная минерализация гидротермальных месторождений золота представлена преимущественно сульфидами, для понимания механизма формирования АСГП большой интерес представляет анализ закономерностей возникновения и функционирования сероводородного барьера. Как показывают исследования современных геотермальных систем, металлоносные растворы в них (преимущественно, хлоридные) резко обеднены сульфидной серой [11]. То же самое мы обычно видим в составе газово-жидких включений в гидротермальных месторождениях. Условия для образования гидросульфидных комплексов и последующего выпадения сульфидов возникают только там, где пути движения сероводородных струй и металлоносных флюидов пересекаются. Подобная ситуация была случайным образом смоделирована при добыче рассолов полуострова Челекен. Здесь, в результате смешивания в накопительном чане вод из нескольких скважин, обогащенных тяжелыми металлами, с сероводородсодержащими водами из скважины У-1, началось интенсивное отложение сфалерита [11]. В природных условиях мощные восходящие потоки сульфидной серы характерны для надинтрузивных зон и вулканических аппаратов. При разгрузке их под дном моря, в местах скопления обогащенных тяжелыми металлами рассолов, создаются благоприятные условия для формирования колчеданно-полиметаллических месторождений. Наземная эксгаляционная деятельность вулканов к таким последствиям не приводит, зато накапливаются мощные залежи самородной серы. При образовании магматогенных жильных месторождений сероводород мигрирует по трещинам. В мощных ослабленных зонах концентрация его, видимо, невелика, поскольку он быстро рассеивается, не образуя концентрированных струй, поэтому сульфидная минерализация для этих зон не характерна. При резком раскрытии ограниченных по объему трещин наиболее подвижные кислые газы, включая сероводород, быстро заполняют их, вследствие чего концентрация сульфидной серы здесь многократно возрастает. В результате, в поступающих затем сюда же металлоносных растворах хлоридные комплексы металлов замещаются на гидросульфидные комплексы [12]. После установившегося гидродинамического равновесия подток газов и растворов в трещину прекращается и концентрация сероводорода в ней начинает уменьшаться вследствие его утечки. Гидросульфидные комплексы становятся неустойчивыми, и начинается выпадение сульфидов в последовательности, которая в целом выдерживается для всех гидротермальных месторождений: пирит – арсенопирит – сульфиды Cu, Zn, Pb – сульфосоли. Утечка сероводорода максимальна по периферии трещины, поэтому отложение кварцево-пиритового агрегата начинается отсюда, а оставшиеся растворы отжимаются к центру полости. Последними отлагаются сульфиды металлов, гидросульфидные комплексы которых наиболее устойчивы. Они обычно в наибольшей степени золотоносны. Для их концентрированного накопления благоприятны тектонические подвижки, способствующие стягиванию оставшихся растворов и удалению сероводорода. В еще большей степени такие подвижки необходимы для контактовых месторождений, где малопроницаемая покрышка роговиков способствует накоплению сероводорода в эндоконтактовой зоне интрузивных выступов. Постепенная дегазация при отсутствии заметных тектонических подвижек приводит в этом случае к формированию зон рассеянной сульфидизации и отсутствию концентрированного золотого оруденения.

Таким образом, появление в геохимических полях зон выноса, сопряженных с интенсивными положительными аномалиями является индикатором завершенности процессов минералообразования и формирования концентрированного оруденения. Очень важно, что АСГП разных иерархических уровней являются фигурами подобия. На примере Центрального золоторудного поля (Кузнецкий Алатау) можно видеть, что структура его геохимического поля, на всех иерархических уровнях, определяется сочетанием прямой расходящейся зональности относительно энергетического источника (глубинный разлом) и концентрической сходящейся зональности относительно эпицентров оруденения [13]. Последние представлены скоплениями кварцево-золото-сульфидных жил с березитами и маркируют зоны, где в период рудообразования возникали области разряжения. Если таких областей было немного, сходящаяся зональность проявлена неотчетливо. Примерами являются участки Бурлевский и Варваринский (южная часть рудного поля), где промышленное значение имели лишь несколько непротяженных жил.

Положение золота в структуре АСГП определяется временем его выделения в месторождениях конкретного геолого-промышленного типа. К примеру, в порфировых месторождениях рябиновского типа золото локализовано во фронтальной части АСГП, поскольку основная его часть связана с ранним пиритом. В кварцево-жильных и золото-скарновых месторождениях золото выделялось одним из последних, поэтому занимает в структуре концентрических АСГП центральное место. В колчеданно-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая, где проявлена стадийная центробежная зональность, золото связано с поздней барит-полиметаллической стадией, поэтому в структуре АСГП занимает обычно фронтальное положение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поспелов Г.Л. Строение и развитие фильтрующихся гидротермальных рудообразующих систем // Геология и геофизика. – 1962. – № 11, 12. – С. 28–40, 40–57.
2. Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
3. Питулько В.М., Крицук И.Н. Основы интерпретации данных поисковой геохимии. – Л.: Недра, 1990. – 336 с.
4. Иванкин П.Ф. Морфология глубоковскрытых магматогенных рудных полей. – М.: Недра, 1970. – 288 с.
5. Бутенко В.А. Геолого-геохимическая модель процесса грейзенизации гранитов с W-Mo оруденением // Прикладная геохимия. Вып. 3. – М.: ИМГРЭ. – 2002. – С. 116–133.
6. Рундквист Д.В., Неженский И.А. Зональность эндогенных рудных месторождений. – Л.: Недра, 1975. – 224 с.
7. Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я., Лось В.Л. Поиски рудных объектов на основе полярной зональности геохимических систем // Прикладная геохимия. Вып. 3. – М.: ИМГРЭ. – 2002. – С. 305–324.
8. Жариков В.А. Некоторые актуальные аспекты проблемы флюидов // Флюидные потоки в земной коре и мантии: Матер. Всеросс. симпозиума. – М.: ИГЕМ, 2002. – С. 11–16.
9. Ворошилов В.Г. Условия формирования Центрального рудного поля в гранитоидах // Руды и металлы. – 1995. – № 3. – С. 68–80.
10. Коротаев М.Ю. Зональность гетерогенных гидротермальных систем // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1990. – № 7. – С. 133–145.
11. Лебедев Л.М. Современные рудообразующие гидротермы. – М.: Недра, 1975. – 261 с.
12. Баранова Н.Н. Физико-химические условия переноса свинца в гидротермальном процессе // Геохимия гидротермального рудообразования / Под ред. В.Л. Барсукова. – М.: Наука, 1971. – С. 173–196.
13. Коробейников А.Ф., Ворошилов В.Г., Ананьев Ю.С., Пшеничкин А.Я. Рудно-метасоматическая и геохимическая зональность золоторудных месторождений Средней Сибири // Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края: Матер. научно-практ. конф. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – С. 220–225.

УДК 553.493.5:550.4(571.15)